

자속추정기에 의한 유도전동기 센서리스 속도제어

김종수¹⁾, 정병건²⁾

Sensorless Speed Control of Induction Motor with Speed Estimator

Abstract

Several methods of induction motor drives, which used speed estimators instead of shaft encoders, have been reported.

However, the speed-sensorless vector control of induction motor by estimators employing stator voltages and currents usually deteriorates as the speed gets lower because it is difficult to calculate rotor flux due to DC-offset and saturation of integrators.

In this paper, to calculate rotor flux at low speed, the new rotor flux estimator which replaces integrators with two lag circuits is proposed.

Simulation and experiment results confirm the validity of this control scheme.

1. 서론

기계적 구조가 견고하고 보수 및 유지가 용이하며 가격이 저렴한 유도 전동기의 순시 토크제어를 위해서 자속기준 제어 즉, 벡터제어가 많이 적용되고 있다.

1) 한국해양대학교 기관공학과 직사과장 전기제어전공

2) 한국해양대학교 기관공학과 조교수

자속기준제어란 빠른 과도응답을 갖는 토오크제어를 위하여 유도전동기의 고정자 전류를 자속각을 기준으로 자속성분 전류와 토크성분 전류로 분리시켜 독립적으로 제어하며 자속성분 전류는 항상 기준자속벡터와 일치하도록 하고 토크성분 전류는 기준자속벡터와 직교하도록 제어하는 방법이다.

그러나 고성능 벡터제어를 실현하기 위해서는 전압, 전류값 뿐만 아니라 자속이나 속도정보가 필수적이다. 그중, 속도검출을 위해 TG 또는 엔코더 등을 사용하는데 이는 구동장치의 가격상승과 신뢰도 및 외란에 대한 강인성을 감소시킨다.

이런 문제점을 해소하기 위해 속도센서없는 센서리스 구동방식에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 이들의 대부분은 여러가지 기법을 이용하여 속도를 추정, 보상하여 회전자 속도정보로 사용하였다.

이들중 속도추정기에 의한 센서리스 제어방식은 고정자전압과 전류값에 의해 자속을 추정하고 전류와 추정자속값을 이용하여 회전자 속도정보를 얻는 방식이다. 하지만 자속값을 구하기 위해서는 적분기가 요구되는데 이는 포화 및 DC오프셋의 영향으로 저속이나 기동시에는 정확한 자속정보를 기대하기 어렵다.

본 논문에서는 적분기를 사용하지 않고 역기전력과 자속설정치를 두개의 지연회로에 각각 인가하여 그 합을 자속추정치로 간주하고, 이 자속추정치와 A/D 컨버터에 의해 검출한 고정자 전류값을 전압방정식에 적용함으로써 회전자 속도를 추정하는 센서리스 제어법을 제안하였다. 이로인해 저속에서도 비교적 정확한 회전자속도의 계산이 가능하였고 시뮬레이션 및 실험을 통해 그 유효성을 확인하였다.

2. 유도전동기의 벡터제어

유도전동기는 직류기와 비교하였을 때 크기, 회전자관성, 최대속도 발생능력, 효율 및 비용면에서 우수하지만 제어성능면에서 미치지 못한다.

유도전동기는 고정자전류중에 자속성분 및 토크성분을 동시에 포함하고 있어서 고정자전류와 회전자계간의 공간각이 변화하고 복잡한 관계를 가지고 있어서 직류기와 같은 제어는 어렵다.

그래서 빠른 과도응답을 가지면서 유도전동기의 고정자전류를 자속각을 기

준으로 자속성분 전류와 토크성분 전류로 분리시켜 독립적으로 제어하는 방식을 택하는데 이 방법을 자속기준제어(field oriented control) 혹은 벡터제어(vector control)라고 한다.

이때, 자속성분 전류는 항상 기준자속벡터와 일치하도록 하며 동기회전좌표계의 d 축 성분에 해당한다. 또, 토크성분 전류는 기준자속벡터와 직교하도록 제어하며 동기회전좌표계의 q 축 성분에 해당한다.

자속기준제어 원리를 이용하여 고정자전류의 자속성분 및 토크성분간의 전기각을 90° 로 유지시켜 분리 제어함으로써 직류기와 같은 제어특성을 얻을 수 있다.

3. 유도전동기의 센서리스 속도제어

3.1 기존의 속도추정기에 의한 방법

전류와 추정자속으로 부터 속도정보를 얻어 제어하는 방법으로 일반 적인 계통도는 Fig. 1과 같다.

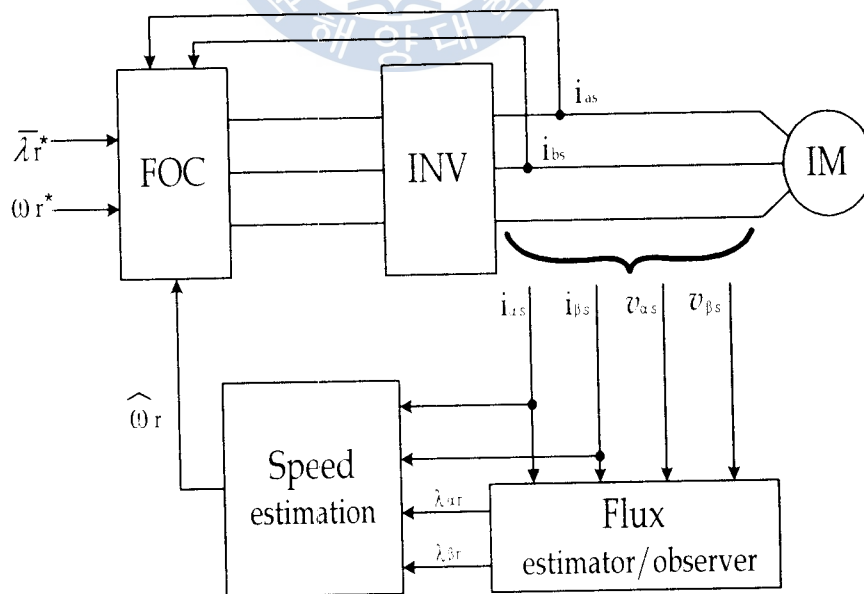


Fig. 1 The block diagram of sensorless speed control method by speed estimator

유도전동기의 발생토크를 동기회전좌표계 및 고정좌표계상의 값으로 나타내면 식(3-1)과 같다.

$$T_e = -\frac{L_m}{L_r} |\lambda_r| i_{qs} = -\frac{L_m}{L_r} (\lambda_{ar} i_{\beta s} - \lambda_{\beta r} i_{as}) \quad (3-1)$$

단, λ_r : 회전자자속 (= $\lambda_{ar} + j\lambda_{\beta r}$)

λ_{ar} , $\lambda_{\beta r}$: 고정자에 고정된 α - β 축의 회전자자속

i_{as} , $i_{\beta s}$: α - β 축의 고정자전류

토크전류는 식(3-1)에 의해 식(3-2)와 같다.

$$i_{qs} = \frac{\lambda_{ar} i_{\beta s} - \lambda_{\beta r} i_{as}}{|\lambda_r|} \quad (3-2)$$

벡터제어시 슬립주파수는 식(3-3)과 같다.

$$\omega_{sl} = \frac{L_m}{T_r} \frac{i_{qs}}{|\lambda_r|} \quad (3-3)$$

단, T_r : 회전자시정수 (= $\frac{L_r}{R_r}$)

식(3-2)를 식(3-3)에 대입하면 슬립주파수는 식(3-4)와 같이 된다.

$$\omega_{sl} = \frac{L_m}{T_r} \frac{(\lambda_{ar} i_{\beta s} - \lambda_{\beta r} i_{as})}{|\lambda_r|^2} \quad (3-4)$$

반면에, 자속각은 식(3-5)와 같으므로 동기속도는 식(3-6)으로 나타낼 수 있다.

$$\theta_e = \tan^{-1} \left(\frac{\lambda_{\beta r}}{\lambda_{ar}} \right) \quad (3-5)$$

$$\omega_e = \frac{d\theta_e}{dt} = \frac{\lambda_{ar} p\lambda_{\beta r} - \lambda_{\beta r} p\lambda_{ar}}{|\lambda_r|^2} \quad (3-6)$$

식(3-4)와 식(3-6)에 의해 회전자속도는 식(3-7)과 같다.

$$\omega_r = \frac{\lambda_{ar} p\lambda_{\beta r} - \lambda_{\beta r} p\lambda_{ar}}{|\lambda_r|^2} - \frac{L_m}{T_r} \cdot \frac{\lambda_{ar} i_{\beta s} - \lambda_{\beta r} i_{as}}{|\lambda_r|^2} \quad (3-7)$$

식 (3-7)을 이용하여 속도를 추정하기 위해서는 회전자 자속정보가 요구되는데 이는 식(3-8) 및 식(3-9)에 의해 얻을 수 있다.

$$\lambda_{\alpha r} = \int (v_{\alpha s} - R_s i_{\alpha s}) dt - \sigma L_s i_{\alpha s} \quad (3.8)$$

$$\lambda_{\beta r} = \int (v_{\beta s} - R_s i_{\beta s}) dt - \sigma L_s i_{\beta s} \quad (3.9)$$

단, $v_{\alpha s}, v_{\beta s} : \alpha - \beta$ 축 고정자전압

하지만, 식(3.8) 및 식(3.9)에 의해 자속값을 구하는 방법은 적분기가 사용되는데 이는 저속에서 DC오프셋 및 포화의 영향으로 정확한 자속정보를 기대하기 어렵다.

3.2 본 논문에서 제안하는 자속추정에 의한 센서리스 속도제어

앞절에서 언급한 바와 같이 순수적분기에 의해서는 자속추정이 어려우므로 1차 지연회로를 사용하여 회전자 자속값을 산출하는 방식이 주로 적용된다.

전동기 역기전력은 식(3.10)과 같이 고정자 전압, 전류 및 전동기파라메타에 의해 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{e} &= v_s - (R_s^* + l^*p)i_s \\ &= e + (\Delta R_s + \Delta l p)i_s \end{aligned} \quad (3.10)$$

단, $\hat{e}, e : \text{역기전력 추정치와 실제 역기전력}$

$$v_s = v_{\alpha s} + jv_{\beta s}$$

$$i_s = i_{\alpha s} + ji_{\beta s}$$

$R_s^* : \text{고정자 저항 공칭값}$

$l_s^* : \text{누설인덕턴스 공칭값} [= L_s^*(1 - L_m^{*2}/L_s^*L_r^*)]$

$$\Delta R_s = R_s - R_s^*$$

$$\Delta l = l - l^*$$

$R_s : \text{고정자 저항 실제값}$

$l : \text{누설인덕턴스 실제값}$

위 식에서 구한 역기전력을 지연회로에 인가하여 회전자자속을 추정하면 다음식과 같다.

$$\hat{\lambda}_r = \frac{T_L}{1 + T_L p} \hat{e} \quad (3-11)$$

단, T_L : 지연회로의 시정수
 정상상태에서 식(3-11)은 식(3-12)가 되고 자속위상각 오차는 식(3-13)과 같다.

$$\hat{\lambda}_r = \frac{T_L}{1 + j\omega_e T_L} \hat{e} \quad (3-12)$$

$$\delta_c = \tan^{-1}(1/\omega_e T_L) \quad (3-13)$$

단, δ_c 는 자속위상각 오차이다.
 식(3-13)에 의해, 고속에서는 ω_e 가 큰 값이므로 비교적 정확한 자속추정이 가능하지만 저속에서는 자속각의 오차가 발생한다. 이러한 문제점을 해소하기 위해 회전자 자속 설정치에 또 다른 지연회로를 인가하여 두 개의 지연회로를 사용하면 다음식이 된다.

$$\hat{\lambda}_r = \frac{T_L}{1 + T_L p} \hat{e} + \frac{1}{1 + T_L p} \lambda_r^* \quad (3-14)$$

단, λ_r^* : 회전자자속 설정치
 정상상태에서 식(3-14)는 식(3-15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{\lambda}_r = F_L T_L \hat{e} + F_L \lambda_r^* \quad (3-15)$$

여기서, $F_L = \frac{1}{1 + j\omega_e T_L} = \frac{1}{[1 + (\omega_e T_L)^2]^{1/2}} e^{-j\gamma_c}$

$$\gamma_c = \tan^{-1}(\omega_e T_L)$$

Fig. 2는 앞에서 기술한 지연회로에 의한 자속추정 벡터도를 도시하고 있다.

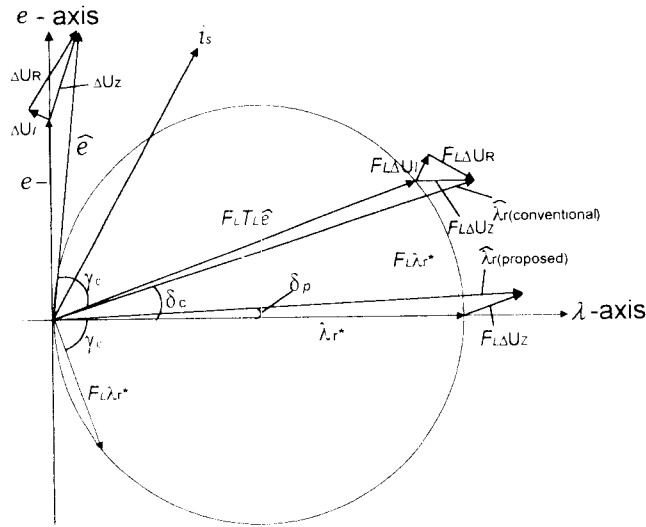


Fig. 2 The vector diagram of the proposed flux estimator

단, 위 그림에서

$$\Delta U_R = \Delta R_s i_s$$

$$\Delta U_I = j\omega_c \Delta i_s$$

$$\Delta U_Z = \Delta U_R + \Delta U_I$$

위 그림에서 제안한 방식의 오차 (δ_p)가 기존 방식의 자속각 오차 (δ_c)보다 훨씬 작음을 알 수 있다.

Fig. 3은 두 개의 지연회로를 사용하여 그 합을 회전자 자속으로 추정하는 블록도이다.

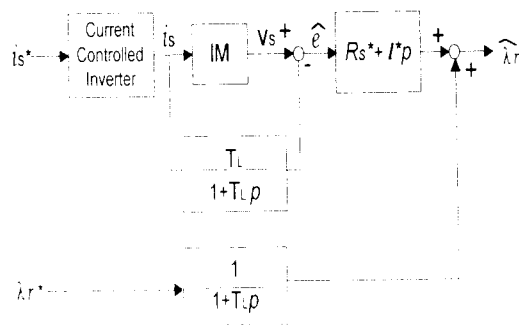


Fig. 3 The block diagram of the rotor-flux estimator using two the lag circuits

Fig. 4는 제안한 방식을 이용하여 유도전동기 센서리스 속도제어를 구현하는 계통도를 나타낸다.

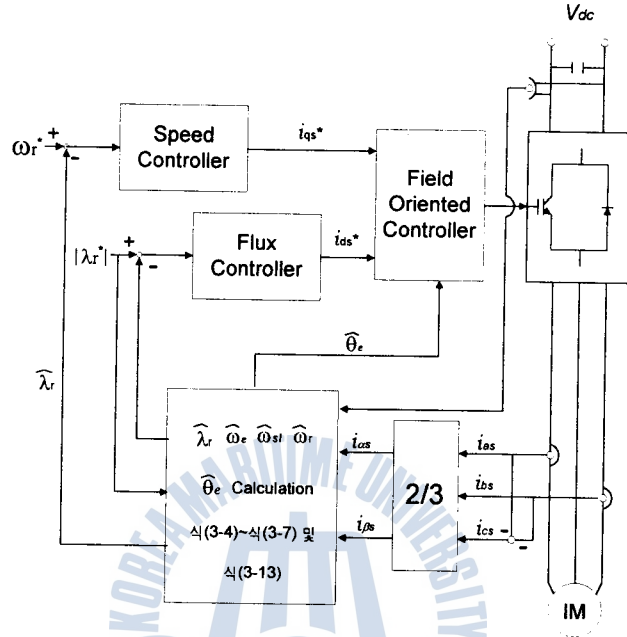


Fig. 4 The block diagram of the proposed sensorless speed control

4. 시뮬레이션 및 검토

본 논문에서 제안하는 속도추정기에 의한 센서리스 속도제어 방식의 유효성을 입증하기 위해 실험에 앞서 시뮬레이션을 행하였다.

Fig. 5는 $0 \rightarrow 50[\text{rpm}]$ 의 계단 속도지령에 대한 무부하 운전의 속도응답 시뮬레이션 결과를 도시하고 있으며 저속에서도 양호한 제어특성을 보이고 있음을 알 수 있다.

또한, Fig. 6은 지령속도를 $100[\text{rpm}]$ 으로 가했을 경우의 전동기의 속도응답을 나타내고 있으며 속도응답의 속응성이 양호함을 보여주고 있다.

Fig. 7은 $200[\text{rpm}]$ 으로 구동중 $5[\text{N}\cdot\text{m}]$ 의 부하를 인가하였을 경우의 응답으로 부하특성이 우수함을 보여주고 있다.

Fig. 8은 $300[\text{rpm}]/\text{sec}^2$ 의 등가속도로 $300[\text{rpm}]$ 까지 속도지령을 증가시켜 그대로 유지한 후, $t = 5[\text{sec}]$ 시점부터 $-300[\text{rpm}]/\text{sec}^2$ 의 등가속도로 $-300[\text{rpm}]$ 까

지 감소시켜 유지한 경우의 응답을 나타내고 있다. 속도지령의 변화에도 잘 추종함을 보여주고 있다.

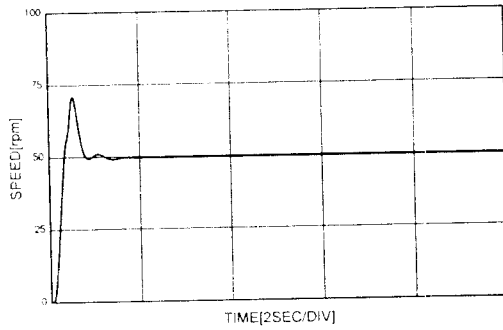


Fig. 5 Simulation response for step change of speed setting (0→50[rpm])

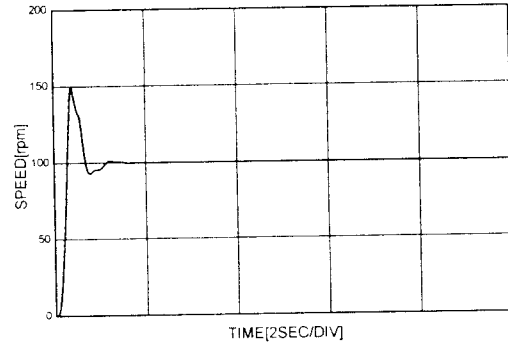


Fig. 6 Simulation response for step change of speed setting (0→100[rpm])

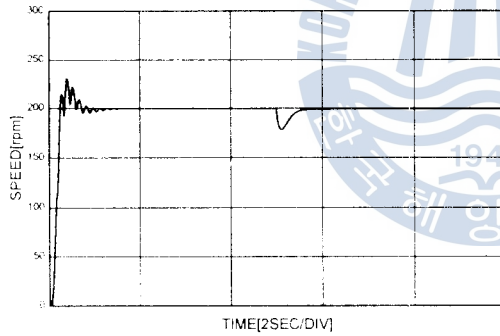


Fig. 7 Simulation response for step change of load torque (200[rpm], 0→5[N·m])

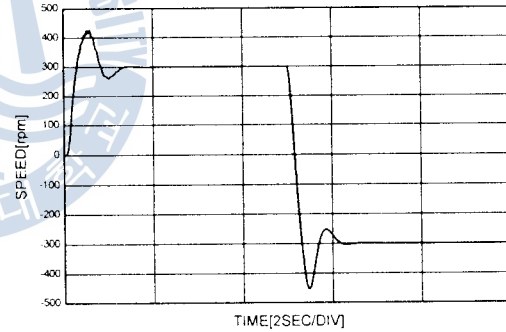


Fig. 8 Simulation response for continuous change of speed setting (0→300→300[rpm])

5. 실험장치의 구성과 실험결과 및 검토

5.1 하드웨어의 구성

속도추정기에 의한 속도제어시스템을 구현하기 위한 하드웨어의 구성은 크게

CPU 회로, 상전류 및 DC 링크전압 검출회로, 게이트 구동회로, 전력회로로 나누고 속도응답 특성의 검정을 위해 별개로 속도 검출회로가 필요하다. Fig. 9 및 Fig. 10은 각각 게이트 구동회로와 전력회로를 나타낸다.

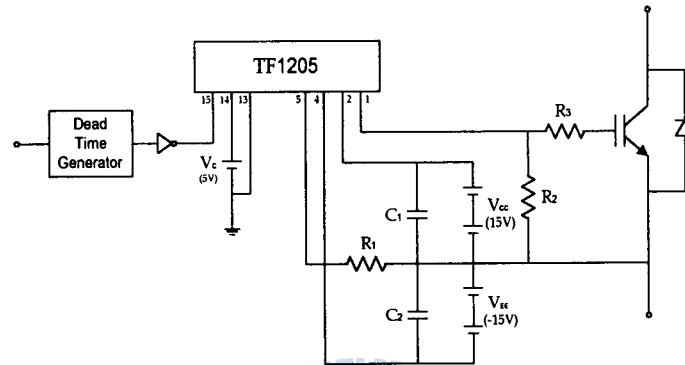


Fig. 9 Configuration of gate drive circuit

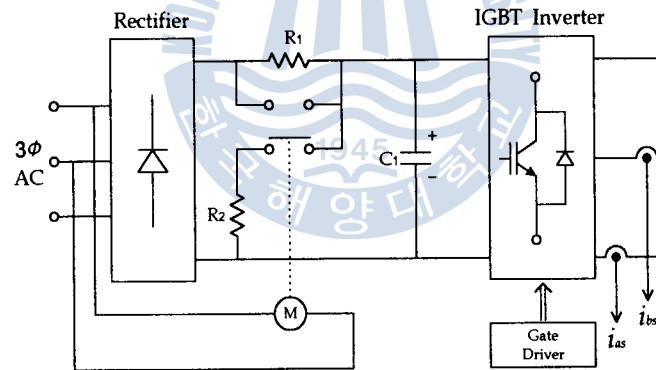


Fig. 10 Configuration of power circuits

5.2 소프트웨어의 구성

제어루틴은 소프트웨어 타이머 인터럽터에 의해 실행되는데 타이머에 기입된 임의의 데이터에 기초하여 일정하게 주기적으로 수행된다.

먼저, A/D변환기를 이용하여 전동기 상전류 i_{as} , i_{bs} 및 DC 링크전압을 샘플링한 후 i_{ds} , i_{qs} 및 v_{as} , v_{bs} 를 계산한다. 식(3-9)에 의해 역기전력을 얻어

식(3-13)을 적용하여 두 개의 지연회로를 인가한 자속추정치를 계산한다. 다음에, 식(3-7)에 의해 회전자속도를 추정하여 속도제어기를 통해 토크전류 지령치 i_{qs}^* 를, 자속전류설정치에 의해 i_{ds}^* 를 구하여 실제 전류와 비교함으로써 d, q 축 지령전압을 얻는다.

또한, v_{ds}^*, v_{qs}^* 에 해당하는 인버터 출력전압을 얻기 위한 공간벡터를 선택하게 된다. θ_e 는 식(3-6)을 적분하여 계산한다.

공간전압벡터 루틴에서는 정확한 전압이 인가될 수 있도록 $V_{dc}, \theta_e, v_{ds}^*, v_{qs}^*$ 를 이용하여 선택된 전압벡터의 소요시간을 타이머로 출력시킨 후 다음 인터럽터를 기다린다.

5.3 실험결과 및 검토

Fig. 11은 0 → 50[rpm]의 계단속도지령에 대한 응답 실험결과를 나타내고 있으며 저속에서의 속도제어가 양호함을 보여주고 있다.

또한, Fig. 12는 100[rpm]의 속도지령에 대한 속도응답으로 우수한 응답특성을 나타내고 있다.

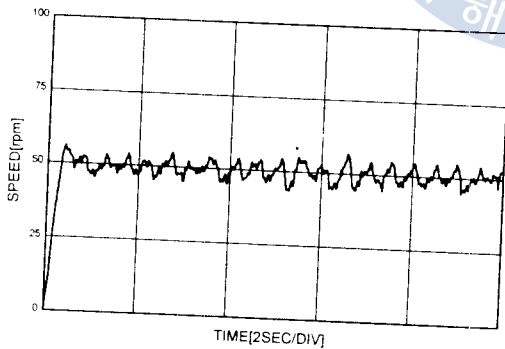


Fig. 11 Experiment response for step change of speed setting (0→50[rpm])

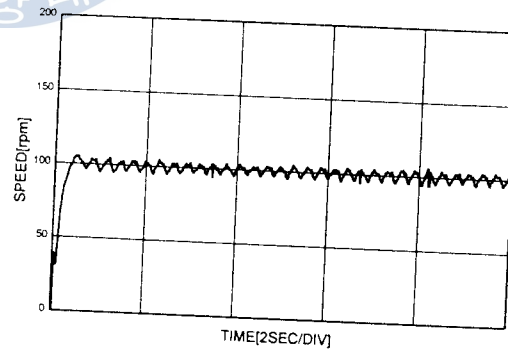


Fig. 12 Experiment response for step change of speed setting (0→100[rpm])

Fig. 13은 200[rpm]으로 구동중 5[N·m]의 계단부하토크를 인가하였을 경우의 응답을 보여주고 있으며 중·저속에서의 속도 및 부하특성이 양호함을

보여주고 있다.

Fig. 14는 $300[\text{rpm}]/\text{sec}^2$ 의 등가속도로 $300[\text{rpm}]$ 까지 속도지령을 증가시켜 그대로 유지한 후, $t = 5[\text{sec}]$ 시점부터 $-300[\text{rpm}]/\text{sec}^2$ 의 등가속도로 $-300[\text{rpm}]$ 까지 감소시켜 정지상태로 유지한 경우의 응답을 나타내고 있다. 속도지령의 변화에도 잘 추종함을 보여주고 있다.



Fig. 13 Experiment response for step change of load torque ($200[\text{rpm}]$, $0 \rightarrow 5[\text{N}\cdot\text{m}]$)

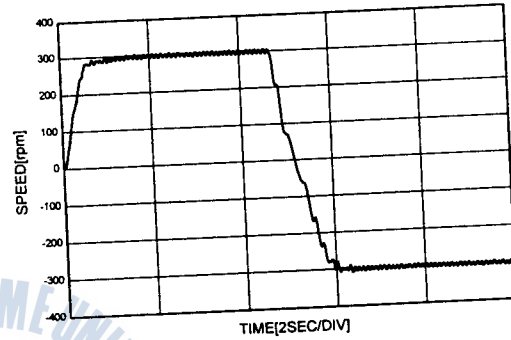
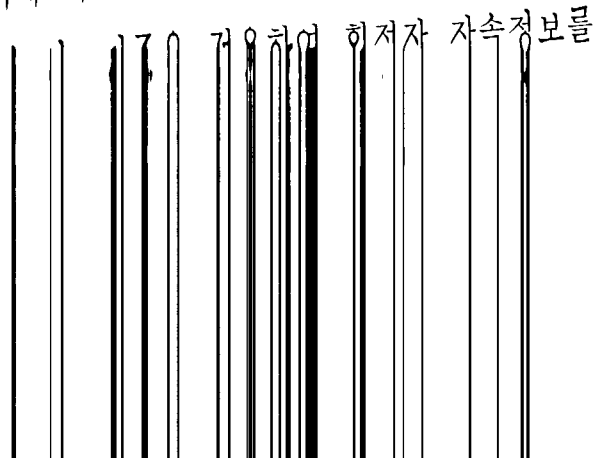


Fig. 14 Experiment response for continuous change of speed setting ($0 \rightarrow 300 \rightarrow -300[\text{rpm}]$)

6. 결론

현재 사용중인 전동기중 그 수요가 가장 많은 유도전동기의 순시토크를 제어하기 위해서는 회전자 속도정보가 필수적이다. 그러나 속도센서를 사용할 경우에는 기계적으로 취부하기도 힘들 뿐만 아니라 경제성도 떨어져 새로운 방식의 제어기법들이 활발히 연구되고 있는 현실이다. 센서를 사용하지 않는 방법 또한 다양하며 센서리스 속도제어 방식은 여러가지 면에서 제어특성상 이점을 줄 수 있다.

본 논문에서 제안한 속도추정기에 의한 방식은 전동기의 고정자 전압, 전



식(3-13)을 적용하여 두 개의 지연회로를 인가한 자속추정치를 계산한다. 다음에, 식(3-7)에 의해 회전자속도를 추정하여 속도제어기를 통해 토크전류 지령치 i_{qs}^* 를, 자속전류설정치에 의해 i_{ds}^* 를 구하여 실제 전류와 비교함으로써 d, q 축 지령전압을 얻는다.

또한, v_{ds}^*, v_{qs}^* 에 해당하는 인버터 출력전압을 얻기 위한 공간벡터를 선택하게 된다. θ_e 는 식(3-6)을 적분하여 계산한다.

공간전압벡터 루틴에서는 정확한 전압이 인가될 수 있도록 $V_{dc}, \theta_e, v_{ds}^*, v_{qs}^*$ 를 이용하여 선택된 전압벡터의 소요시간을 타이머로 출력시킨 후 다음 인터럽터를 기다린다.

5.3 실험결과 및 검토

Fig. 11은 0 → 50[rpm]의 계단속도지령에 대한 응답 실험결과를 나타내고 있으며 저속에서의 속도제어가 양호함을 보여주고 있다.

또한, Fig. 12는 100[rpm]의 속도지령에 대한 속도응답으로 우수한 응답특성을 나타내고 있다.

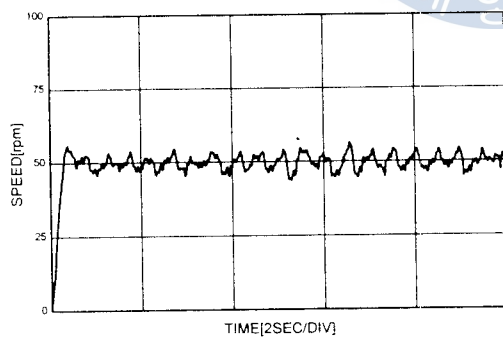


Fig. 11 Experiment response for step change of speed setting (0→50[rpm])

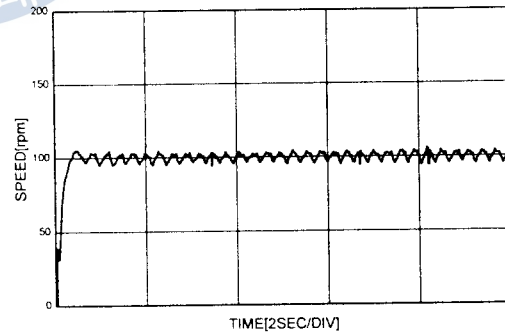


Fig. 12 Experiment response for step change of speed setting (0→100[rpm])

Fig. 13은 200[rpm]으로 구동중 5[N·m]의 계단부하토크를 인가하였을 경우의 응답을 보여주고 있으며 중·저속에서의 속도 및 부하특성이 양호함을

보여주고 있다.

Fig. 14는 $300[\text{rpm}]/\text{sec}^2$ 의 등가속도로 $300[\text{rpm}]$ 까지 속도지령을 증가시켜 그대로 유지한 후, $t = 5[\text{sec}]$ 시점부터 $-300[\text{rpm}]/\text{sec}^2$ 의 등가속도로 $-300[\text{rpm}]$ 까지 감소시켜 정지상태로 유지한 경우의 응답을 나타내고 있다. 속도지령의 변화에도 잘 추종함을 보여주고 있다.

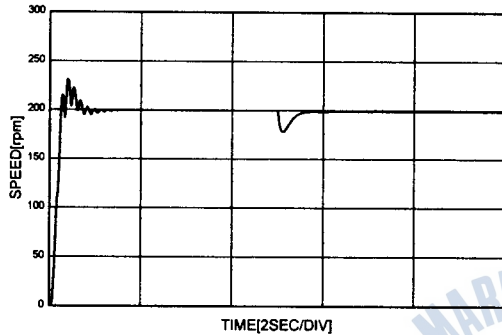


Fig. 13 Experiment response for step change of load torque ($200[\text{rpm}]$, $0 \rightarrow 5[\text{N}\cdot\text{m}]$)

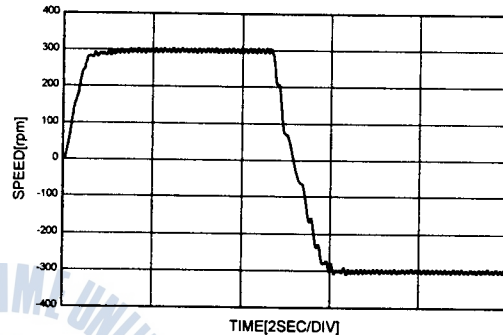


Fig. 14 Experiment response for continuous change of speed setting ($0 \rightarrow 300 \rightarrow -300[\text{rpm}]$)

6. 결론

현재 사용중인 전동기중 그 수요가 가장 많은 유도전동기의 순시토크를 제어하기 위해서는 회전자 속도정보가 필수적이다. 그러나 속도센서를 사용할 경우에는 기계적으로 취부하기도 힘들 뿐만 아니라 경제성도 떨어져 새로운 방식의 제어기법들이 활발히 연구되고 있는 현실이다.

센서를 사용하지 않는 방법 또한 다양하며 센서리스 속도제어 방식은 여러가지 면에서 제어특성상 이점을 줄 수 있다.

본 논문에서 제안한 속도추정기에 의한 방식은 전동기의 고정자 전압, 전류 및 자속으로 구성되는 속도추정 알고리즘을 적용하여 회전자 자속정보를 구하고 속도정보를 얻는 방법이다.

특히, 본 연구에서는 정확한 자속정보를 얻기 위해 DC옴셋과 포화를 발생 하는 적분기를 사용하지 않고 역기전력과 자속설정치를 각각 지연회로에 인가하여 그 합을 자속추정치로 취하는 알고리즘을 적용함으로써 속도센서를 부

작하시 않아도 저속 및 기동시에도 비교적 우수한 속도제어를 행할 수 있었으며 이를 시뮬레이션 및 실험을 통해서 입증할 수 있었다.

본 논문의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 회전자 속도정보를 얻기 위해서 흔히 사용하고 있는 TG나 엔코더등의 센서를 사용하지 않는 센서리스 속도제어 방식을 구현하였다.
- 2) 고정자 전압 및 전류에 의해 얻은 역기전력과 자속설정치를 두 개의 식연 회로에 각각 인가하여 그 합을 자속추정치로 이용함으로써 비교적 정확한 속도정보를 구할 수 있다.
- 3) 시뮬레이션 및 실험결과 우수한 속도응답특성과 안정성을 확인할 수 있었다.
- 4) 속도지령 및 부하변동시에도 속응성이 비교적 우수하며 저속에서도 정상오차가 미소한 결과를 얻을 수 있었다.

참고문헌

- [1] A. Fratta, A.Vagati, F.Villata ; " Vector Control of Induction Motors without Shaft Transducers ", Conf. Rec. IEEE PESC, '88, pp. 839-846.
- [2] H.Nakano, I.Takahashi ; " Sensorless Field Oriented Control of an Induction Motor Using an Instantaneous Slip Frequency Estimation Method ", Conf. Rec. IEEE PESC, '88, pp. 847-854.
- [3] T.Kanamachi, I.Takahashi ; " Sensorless Speed Control of an induction Motor with no Influence of Secondary Resistance Variation ", Conf. Rec. IEEE IAS, '93, pp. 408-413.
- [4] U.Baader, M.Depenbrock, G.Gierse ; " Direct Self Control of Inverter fed Induction Machine, a Basis or speed Control without Speed Measurements ", Conf. Rec. IEEE IAS, '89, pp. 486-492.
- [5] N.Takada, K.Tanaka, T.Ohtani ; " Vector Control of Induction Motor without Shaft Encoder ", IEEE Trans. Indus. Appli., vol. 28, no. 1, '92,

- pp. 157-164.
- [6] Peter Vas, " *Vector Control of AC Machines* ", from Clarendon press. Oxford, 1990.
- [7] B. K. Bose, " *Power Electronics and AC Drives* ", from Prentice-Hall, 1987.
- [8] A. Abbondanti, " Methods of Flux Control in Induction Motors Driven by Variable Frequency, Variable Voltage Supplies ", IEEE IAS Ann. Mtg., pp. 177-184, 1977.
- [9] R. Joetten, G. Maeder, " Control Methods for Good Dynamic Performance Induction Motor Drives Based on Current and Voltage as Measured Quantities ", IEEE Trans. Indus. Appli., vol. 19, no. 3, pp. 356-363, 1983.
- [10] 설승기 외 7인 ; " 전동기 구동시스템 설계 및 실습 ", 서울대학교 전력전자 연구실 하계교육강좌, 1995.

